Ciencia e Ingeniería
Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías.
Año 2014, Enero-Junio, Vol. (1) N° (1) ISSN 2389-9484.
Universidad de La Guajira, Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.
La Guajira-Colombia.
Revista en Línea http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei



MODELADO DE UN TREN ELÉCTRICO EN MOVIMIENTO SOBRE UN RIEL UTILIZANDO PAQUETES DE SIMULACIÓN

MODELING OF AN ELECTRIC TRAIN MOVING ON A RAIL USING SIMULATION PACKAGES

Sergio Velásquez[1], Ron Febrina[2], Rafael Malavé [2]

[1]Centro de Investigación de las Redes Neuronales y la Robótica CIRNAR-UNEXPO,
[2]Maestría de Ingeniería Electrónica 9na corte Ciudad Guayana, Bolívar 8050 Venezuela Departamento de Ingeniería Eletrónica
febrinarondelgado0@gmail.com.

Recibido: Marzo 14 de 2014 Aceptado: Julio 28 de 2014

RESUMEN

Esta investigación muestra un modelo del movimiento de un tren eléctrico sobre un riel, diseñado a partir de las herramientas SimPowerSystem® y Simulink® pertenecientes al paquete de desarrollo y simulación matemática MATLAB®. El modelo presentado simula el comportamiento de los sistemas eléctricos y mecánicos del tren permitiendo visualizar las variables asociadas a estos, adicionalmente, se presenta una simplificación del modelo eléctrico utilizando comandos básicos de programación de MATLAB®. Este trabajo utilizó la metodología de investigación lógica deductiva como base de desarrollo y a través de las simulaciones efectuadas al modelo presentado, se logró recrear la dinámica de movimiento así como las condiciones a las que se encuentra dicho tren en cada punto de su recorrido.

Palabras Clave: SimPowerSystem, Simulink, Matlab, Modelo, Dinámica de movimiento.

ABSTRACT

This research shows a model of an electric train moving on a rail, designed from the SimPowerSystem® and Simulink® tools from MATLAB®. The model simulates the behavior of electrical and mechanical systems, allowing to display the variables associated at these, further, a simplified electrical model is presented using basic MATLAB® programming commands. This study used the methodology of deductive logic as a basis for research, through the presented model simulations; it was possible to recreate the dynamics of movement and the conditions to which that station is located at each point of its travel.

Keywords: SimPowerSystem, Simulink, Matlab, Model, Dynamics of movement.

1. INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, el ser humano ha sentido la necesidad de trasladarse de un lugar a otro y recorrer grandes distancias. Desde la invención de la rueda, el hombre ha creado diversos dispositivos que le han ofrecido facilitar su trabajo permitiéndole movilidad, esto a su vez generó una aceleración en el desarrollo de nuevas herramientas y por consiguiente, la creación de máquinas automotrices capaces de mover grandes cargas por un tiempo prolongado y de esta forma, recorrer grandes distancias. El posterior desarrollo del motor eléctrico y su implementación en sistemas de transporte ferroviario permitió mejorar las características de desempeño de los muy comunes (en ese momento) trenes diesel, dichas características son:

- Aumento de la capacidad de carga y velocidad de desplazamiento.
- No necesitan repostar (la fuente de energía es casi ilimitada)
- Genera menores costos de mantenimiento.

Adicional a esto, los motores eléctricos son muchos más pequeños, silenciosos y menos contaminantes, lo que permitió ofrecer un viaje más confortable, hecho que fue toda una revolución en la historia del ferrocarril y que conllevó, por otro lado a la implementación y mejora de los sistemas de alimentación eléctrica, que permitieran transportar la energía hasta su punto de consumo. Durante casi un siglo, los trenes eléctricos utilizaron casi en exclusiva motores de corriente continua. Sin embargo, debido a la evolución de los motores de corriente alterna y sus sistemas electrónicos de control, en la actualidad, todos los trenes nuevos utilizan motores asíncronos.

Dado a que los motores de cada tren requieren de una potencia concreta en cada momento, los sistemas de alimentación eléctrica suministran energía con unos valores prácticamente constantes. Por lo tanto, adaptar la intensidad de la corriente a las necesidades de la marcha es tarea independiente del tren y su cadena de tracción. Por esta razón, entre el sistema de alimentación y el motor hay siempre un dispositivo de control de la electricidad. De no existir, los motores se pondrían a pleno funcionamiento a la hora de conectarlos a la red, lo que, evidentemente, no es nada práctico.

A través del tiempo, estos sistemas de control han ido evolucionando desde los de tipo reostático, que controlan la intensidad de la corriente mediante bancos de resistencias, pasando por el sistema ‘Chopper’ (utilizado por los trenes eléctricos más rudimentarios) y que también es conocido como un ‘troceador’ de energía, que básicamente se encarga de ‘trocear’ la señal constante de la corriente continua en pulsaciones. Mediante la combinación correcta de pulsaciones, se consigue que la corriente de salida varíe. Este aparato de electrónica de potencia, además de conseguir un gran ahorro de energía, permitía una mayor suavidad en el arranque. Este dispositivo facilitó la introducción de los motores de corriente alterna.

Si bien el chopper en los trenes eléctricos fue un gran avance, su uso fue efímero en comparación con los sistemas reostáticos, ya que rápidamente fue reemplazado por sistemas electrónicos más eficientes y más controlables. Ya a principios de los años 90´s la evolución de la electrónica de potencia de los trenes llegó a los denominados IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor o transistor bipolar de puerta aislada), dispositivos que permiten un mayor rendimiento. Controlados con microprocesadores, los IGBT están presentes en todos los trenes eléctricos modernos, incluso en aquellos que reciben corriente continua de la catenaria.

II. DESARROLLO

Los trenes eléctricos funcionan a base de un grupo de motores que pueden ser AC o DC, dicho medio de transporte se beneficia de la eficiencia de los motores eléctricos (cercana al 90%),

además, puede obtenerse una eficiencia adicional con los frenos regenerativos, que permiten convertir la energía cinética en electricidad durante el frenado, retornando electricidad a la línea.

La idoneidad de los motores DC para arrastrar máquinas que precisen una amplia gama de regímenes de velocidad, con un preciso y ajustado control de las mismas, han provocado que últimamente, estos motores tengan más presencia en diversos procesos industriales que requieren de esta característica. En este tipo de motores, para conseguir más velocidad se aplica más tensión, y para que vaya más despacio, menos. Pero, el problema radica en que el tercer riel tiene una tensión fija, por lo que, si se conectara al motor, éste empezaría a girar a la máxima velocidad.

Un modo de reducir el valor de la tensión que le llega al motor través de un divisor de tensión implementado con muchas resistencias en serie, este método está en desuso, actualmente se emplean métodos algo más sofisticados como la modulación por ancho de pulso o sistema chopper, ya explicado en líneas anteriores. En el tipo de motor DC (motor excitado en serie) la armadura y los campos está conectados en serie. Por lo tanto, si se pasa por alto la saturación, el flujo es proporcional a la corriente y la torsión. Esto hace que el motor se adapte en particular para los trabajos que requieran una elevada tracción, grúas, montacargas, trenes etc (Marks, 2011)

Para el sistema de frenado, se aprovecha la naturaleza del motor DC para hacerlo girar en sentido inverso, y de esta forma aprovecharlo como generador, la tensión generada provoca el paso de corriente eléctrica por el arreglo de resistencias, y esto hace que el motor empiece a frenarse, esta es la llamada fuerza contra electromotriz. Por último, la máxima fuerza de frenado se obtiene cortocircuitando el motor, o sea, conectando los bornes del motor entre sí directamente. El inconveniente es que nunca podrá llegar a parar el motor del todo, puesto que, cuanto más despacio gire el motor, menos tensión genera y menos fuerza contra electromotriz habrá, así que llega un momento en que el freno eléctrico no es efectivo, pero al reducirse en gran magnitud la velocidad, entonces es posible emplear el freno de zapatas sin miedo a desgastarlas excesivamente.

El freno eléctrico tiene una ventaja muy importante. Y es que puede ser regenerativo, es decir, que esa energía que antes se iba en calor, ahora se la entrega al riel de alimentación para que cualquier otro tren que circule por ese tramo pueda aprovecharla. Otro inconveniente es que, al ser tensión en continua, ocurrirá que cuando la catenaria u otros trenes no admiten más energía, hay que pasar dicho excedente por las resistencias y perderla en calor.

Otro factor importante a considerar es la fuerza de arrastre, es un fenómeno real que se suele despreciar en condiciones ideales, sin embargo es de una incidencia determinante al momento de analizar a profundidad los sistemas estáticos y dinámicos de desplazamiento de trenes, puesto que tiene una componente que depende de las características fiscas e intrínsecas del tren como el material de las ruedas y su radio, la cantidad de carga del tren y el material de la superficie (carril). Las otras componentes (aerodinámicas) dependen de la velocidad y los coeficientes de fricción del aire a baja y a alta velocidad; es decir, a medida de que el tren se desplaza y la velocidad aumenta, también lo hace el arrastre del tren el cual se pueden aproximar con las ecuaciones de Davis.

III. METODOLOGIA

Como una aplicación práctica de las herramientas SimPowerSystem, Simulink y Matlab se realizó el modelo de un tren eléctrico en movimiento sobre un riel. El circuito electromagnético fue representado utilizando SimPowerSystem, y para representar la dinámica del movimiento se empleó Simulink, por medio de Matlab se codificaron las ecuaciones que describen las características del tren para comparar las respuestas de cada herramienta.

Para realizar el modelo se consideró que el tren se mueve a lo largo de unos rieles llamados "rieles de tracción", que proveen fuerza de fricción a las ruedas para impulsar los vagones.

El tren obtiene su potencia de un tercer riel (usualmente ubicado al lado de los rieles de tracción). La transferencia de potencia desde el tercer riel hacia el tren se realiza usando un conector que se desliza a lo largo del riel (también llamado patín o pantógrafo). El circuito de potencia es completado con los rieles de tracción, la resistencia entra la potencia suministrada y el riel para ambos rieles es variable, por ejemplo, si un tren está viajando a 66 MPH en un set de rieles con resistencia de $10^{-6}\Omega$ por pie, entonces, la resistencia del riel desde la alimentación hacia el tren es de 0.001 Ω cuando el tren está a 1000 pies de la fuente. Si el tren se está moviendo lejos de la fuente, la resistencia del riel se incrementara por 0,00088Ω cada segundo (Gran, 2007)

La tensión y la corriente presente en el motor le dan al tren velocidad, y la resistencia la determina el riel, esto quiere decir que la interacción de la propulsión del tren con la geometría de la pista es no lineal. Así en orden de modelar las interacciones del tren y los rieles se necesita hacer uso de un bloque de resistencia no lineal creado en simulink y presentado a continuación.

Modelado y dimensionamiento de las resistencias del carril.

Los trenes eléctricos se desplazan sobre carriles o rieles, estos además de ser camino de encause físico del tren, son además parte del circuito; ya que son los que cierran el circuito del sistema subestación-tren.

La resistencia eléctrica del carril está ligada intrínsecamente a la posición de tren con respecto a la subestación adyacente, y como el desplazamiento no es lineal, la variación de la resistencia tampoco lo es; esto es un factor importante a considerar por lo que para esta aplicación, se utilizaron cuatro bloques de resistencias no lineales para modelar la resistencia del riel de tracción y del riel de potencia.

Como dato previo se tiene:

$$Rtraction = 2x10^{-6}\Omega / ft \quad (1)$$

$$Rpower = 8,7x10^{-6}\Omega / ft \quad (2)$$

$$Pos_1 = 42543\,ft \quad (3)$$

$$Pos_2 = 47543\,ft \quad (4)$$

$$Pos_3 = 55543\,ft \quad (5)$$

$$Pos_4 = 60543\,ft \quad (6)$$

Esto representa la relación de equivalencia entre la resistencia del carril y la distancia en pies desde la subestación, así como la ubicación de cada subestación.

El diseño de este modelo se basa en cuatro subestaciones, pero el desplazamiento solo ocurre desde la subestación 2 hasta la subestación 3. Esto nos permite plantear un diagrama de bloques que asigne el valor de las resistencias, tal como se muestra en la figura 1.

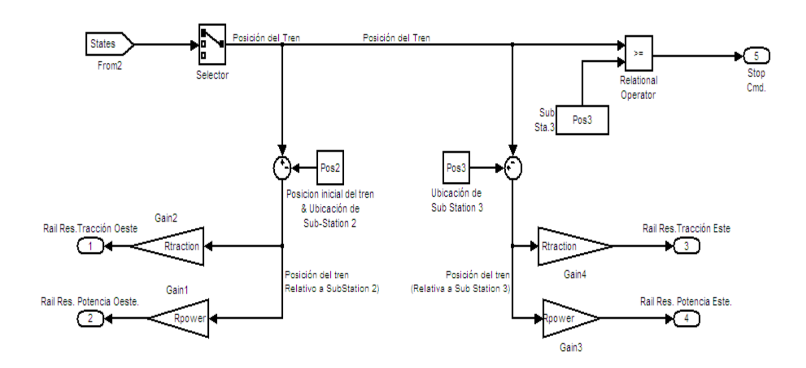


Figura 1. Modelo de la resistencia.

Se puede destacar que R1 es la resistencia de tracción al oeste del tren y R3 es la resistencia de tracción al este del tren, R2 es la resistencia de potencia al oeste del tren y R4 es la resistencia de potencia al este del tren; todas dependen de la posición actual del tren y además se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$R1 = (Pos_{act} - Pos_2) * Rtraction \quad (7)$$

$$R2 = (Pos_{act} - Pos_2) * Rpower \quad (8)$$

$$R\,3 = (Pos_3 - Pos_{act}) * Rtraction \quad (9)$$

$$R\,4 = (Pos_3 - Pos_{act}) * Rpower \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el tren se mueve entre la posición dos y la posición tres, es decir, $Pos_2 \leq Pos_{act} \leq Pos_3$, se tiene:

$$47543\,ft \leq Pos_{act} \leq 55543\,ft \quad (11)$$

La que representa cual será la posición inicial y final del tren durante la simulación.

Al sustituir (1) y (2) en la ecuación (7), (8), (9), y (10) se obtiene el rango de valores entre los que estarán las resistencias mínimas y máximas de tracción y potencia. Estos valores pueden observarse en la tabla I.

Tabla I. Rango de valores de las resistencias de los tramos de riel.

RESISTENCIA	V MIN (Ω)	VMAX (Ω)	LADO	TIPO
R1	0	0,016	OESTE	TRACCIÓN
R2	0	0,0696	OESTE	POTENCIA
R3	0	0,016	ESTE	TRACCIÓN
R4	0	0,0696	ESTE	POTENCIA

Modelado y dimensionamiento del motor del tren.

Para dar inicio al modelado del tren, primero es necesario emplear un motor de tracción, se asumió que el sistema usa corriente directa y también que el sistema mantiene el voltaje de alimentación constante, también se asumió que el motor de tracción está controlado y que cada

uno de los vagones tiene tracción idéntica, todos los motores de tracción se representaron en un solo motor equivalente. El modelo del motor de tracción a usar será un sistema enmascarado donde todos los parámetros requeridos para describir el controlador del tren estarán en la máscara de dialogo.

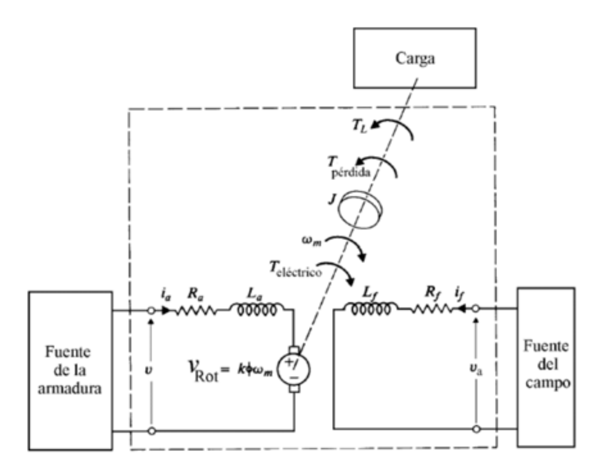


Figura 2. Modelo equivalente del motor DC.

Las relaciones matemáticas que definen el modelo aquí expuesto parten de la relación entre las tensiones de la malla de armadura a través de la ley de voltajes de Kirchhoff (ecuación 12) y de la ley de masas rotantes de Newton (ecuación 13).
Las ecuaciones eléctricas y mecánicas para un motor son:

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = -R_a I_a + V_{in} - V_b \quad (12)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J\omega}(K_m I_a - B_w \omega_m) \quad (13)$$

En este modelo, la f.e.m es una tensión producto de la velocidad del tren y la ganancia *Vconst* (para este diseño *VConst*=4,14). La taza rotacional del motor es deducida a partir de la velocidad del tren y de los engranajes que conectan al motor con la tracción de las ruedas. Otra fuente controlada de tensión esta también en serie con el circuito de la armadura, esta fuente modela el convertidor de voltaje DC que controla la aceleración del tren. Dicho control es del tipo PI, cuyo único aspecto importante es que esencialmente implementa un bloque de resistencia no lineal que emula el camino sobre el cual opera el tren.

La fuerza es resultante de multiplicar el parámetro de motor *ForceConst* y la corriente de armadura (para este diseño *ForceConst*=16,5). A partir de la medición de corriente de armadura, se implementa la aceleración a través de la suma de las fuerzas que interactúan en el tren, que son: la fuerza externa F1, que deriva de la fuerza de gravedad actuando cuando el tren está en un grado de movimiento, la fuerza de fricción, el arrastre aerodinámico y la fuerza de tracción del motor.

Las ecuaciones 12 y 13 fueron fácilmente reproducidas por SimPowerSystem a través de la realización del circuito equivalente del motor DC, mientras que para la simulación en Matlab, fue necesario implementar el "Embedded Matlab Function Block" para reproducir el modelo electromagnético partiendo de sus ecuaciones en el entorno de Simulink (ver figura 4), para ello fue necesario plantear la solución particular de la ecuación diferencial que define a la corriente de armadura (Ia), con lo cual se pudo obtener posteriormente las relaciones para velocidad y aceleración. Debido a que el bloque función seleccionado no procesa los comandos para soluciones numéricas de integrales, fue necesario integrar las señales de velocidad y aceleración

en el entorno simulink para luego ser ingresadas al bloque función, para su evaluación numérica.

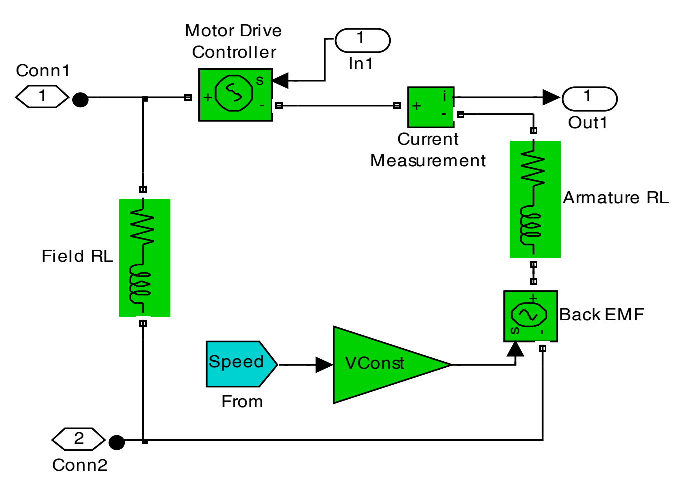


Figura 3. Modelo equivalente del motor DC en SimPowerSystem.

En la figura 3 muestra el modelo equivalente del motor DC implementado en SimPowerSystem, en dicho modelo, la alimentación proveniente del tercer riel (conn1-conn2) tiene en paralelo una impedancia RL que representa la resistencia y la inductancia de campo, la fuente de voltaje denominada "Back EMF" representa la 'fuerza contralectromotriz' generada al momento del frenado del tren, la cual se obtiene de multiplicar la velocidad actual por la f.e.m inducida en el devanado. La corriente medida en el bloque "current Measurement" representa la corriente de armadura a partir de la cual serán calculados (en ambiente Simulink) los valores de velocidad, posición y aceleración.

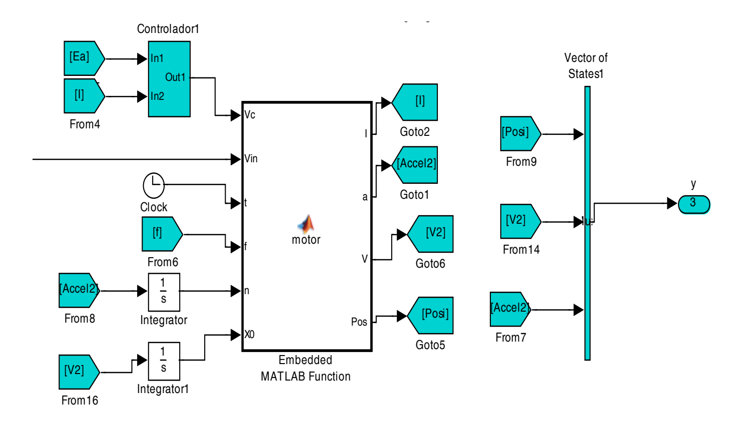


Figura 4. Modelo equivalente del motor DC en Matlab utilizando "Embedded Matlab Function".

Este modelo no será correcto cuando la posición exceda la ubicación de la subestación, para ese caso la topología del modelo deberá ser diferente debido a que la variación de resistencia del carril en las subestaciones debe ser modelada de forma no lineal.

Modelado de la fuerza de arrastre

Para modelar la incidencia del arrastre en el sistema se utilizó como base las investigaciones del Ing. W.J. Davis Jr. De General Electric (1926) (Donald,et al, 1984), quien confeccionó unas tablas y una formula cuadrática conocida como 'Fórmula de Davis', esta fórmula arroja valores bastante exactos para trenes de carga comunes operados entre 5 mph y 60 mph (Barkan, 2007)

en pendientes y curvas comunes. Los resultados serán menos precisos si se utiliza fuera de esos parámetros. De este modo, el modelo del comportamiento del arrastre es dado por la ecuación:

$$arrastre = a + bv + cv^2 \quad (14)$$

Donde el término 'a' no depende de la velocidad (Orellano,2010), sino que proviene de la resistencia mecánica a la rodadura, es decir, del rozamiento de rodadura de las ruedas, que implica el material de las ruedas, radio de las ruedas, carga del tren, tipo de material de la superficie, la fricción en componentes del tren, así como los retrasos de las pastillas de freno, y la fricción en los rodamientos de las ruedas. Para este diseño se estableció 'a' con el nombre de 'Constant_drag' con un valor de:

$$Constant_drag = 1608{,}5 \quad (15)$$

El término 'b' es linealmente dependiente de la velocidad y refleja la resistencia mecánica y las pérdidas del momento de inercia, debido la masa de aire que intercambia el tren con el medio ambiente. Las pérdidas de momento se asocian principalmente con la potencia necesaria para acelerar el aire tomado a la velocidad del tren, este factor también es conocido como arrastre a baja velocidad (Orellano, 2010). Se define la componente lineal al producto '*b.v*'. Para este diseño, se estableció 'b' con el nombre de 'Lin_Drag_force' con un valor de:

$$Lin_Drag_force = 15{,}525 \quad (16)$$

El término 'c' representa el arrastre aerodinámico clásico, que proviene principalmente del el área frontal, el coeficiente numérico de arrastre y la densidad del aire. Se define la componente cuadrática al productor '$c.v^2$'. Para este diseño, se tiene que el área frontal es A=100 ft^2 , y se estableció 'c' con el nombre de 'Quad_Drag_force' con un valor de:

$$Quad_Drag_force = 0{,}27215 \quad (17)$$

Además, la fórmula de Davis considera el peso del tren en Toneladas Americanas o Toneladas Cortas:

$$Peso\ tren\ (USt) = Peso\ tren\ (lb)/2000 \quad (18)$$

De este modo, para cualquier velocidad en *mph* la ecuación (14) nos arroja el valor de fuerza de arrastre en *libras de fuerza*, aunado a esto, la fórmula de Davis considera unos términos adicionales como lo son la resistencia de la pendiente, también considera el perfil del terreno y la resistencia debido la curvatura. La resistencia debido a la pendiente se define:

$$Grade_res = 20lbs.\%Grade.PesoT(USt) \quad (19)$$

Siendo *%Grade* el porcentaje de inclinación, en este caso es de cero a tres por ciento (0-3%) y se utiliza un generador de señales para representarlo (nombrado *Track_Slope*). El *PesoT(USt)*, es el peso total del tren en toneladas cortas, este valor de resistencia debido a la superficie se considera constante para todo tiempo t y se agrupa con a, Es importante destacar que en este modelo se desprecia la resistencia debido a la curvatura puesto que se asume que el desplazamiento es en línea recta, y que este y el arrastre tienen sentidos opuestos (fuerzas que van en dirección contraria y que algebraicamente, se restan a la fuerza ejercida por el motor).

Cálculo de la corriente en Matlab Code

Para calcular la corriente del motor se encontró la solución homogénea de la ecuación diferencial (12) y se planteó un P.V.I (problema de valor inicial) en *t=0* con los valores en ese tiempo arrojados por la simulación de SymPowerSistem, quedando la siguiente ecuación:

$$I = -\frac{\left(Vc - Vin + Vconst * n + C1 * e^{-\frac{ArmRes*t}{ArmInd}} \right)}{ArmRes} \qquad (20)$$

Donde Vc es el voltaje de control, Vin es la tensión de alimentación, n es la velocidad, ArmRes y ArmInd es la resistencia y la inductancia de la armadura respectivamente y C1 es la constante de integración (que por medio del P.V.I se obtiene C1= -147,9731843). Al tener la corriente, ésta se multiplica por el *ForceConstant* para conseguir el par del motor, con la cual (aplicando el modelo mecánico del motor) se genera la ecuación de la aceleración.

$$a = \frac{I * ForceConst - \left(f + n * Lin_Drag_Force + n^2 * Quad_Drag_Force \right)}{TotalMass} \quad (21)$$

La ecuación 21 denota la aceleración del tren, de igual modo, al integrar esta ecuación con una condición inicial de velocidad igual a 30 mph, se obtiene la ecuación de velocidad, y de la misma forma, al integrar la ecuación de velocidad con condición inicial de posición (Pos2), se obtiene la ecuación de posición del tren.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha realizado un experimento numérico en el que se han hecho dos subsistemas tren, uno basado en Matlab dentro del entorno Simulink empleando el bloque 'Embedded Matlab Function Block', que permitió codificar las relaciones matemáticas que representan el modelo electromagnético de un motor DC, y otro empleando SymPowerSistem que reproduce esas ecuaciones plasmando un modelo de circuito eléctrico equivalente, que reproduce la respuesta de las ecuaciones realizadas en Matlab de una forma más real. De esta manera, se comparó la respuesta de ambas herramientas y su efectividad para llevar a cabo el desarrollo de modelos para un análisis de distinta índole, pues la respuesta entregada por la simulación con Matlab es más ideal al tratarse de relaciones matemáticas, por lo que su respuesta es más brusca, mientras que la respuesta entregada por el SymPowerSystem es más real, acercándose al comportamiento de un motor eléctrico verdadero.

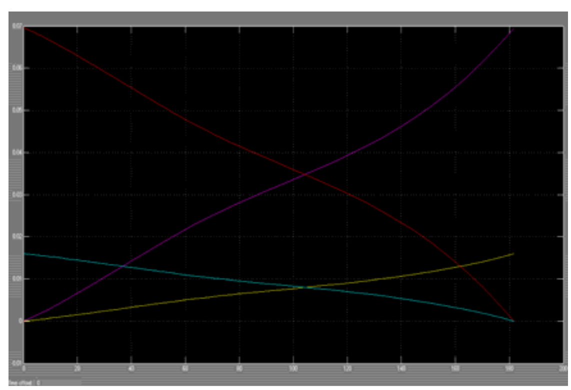


Figura 5. Resistencias de Tracción y Resistencias de Potencia del tren entre SS2 y SS3.

Así mismo, bajo la lógica de control diseñada para el cálculo de las resistencias y con el bloque de modelación '*Nonlineal Resistor'* se pudo apreciar en la figura 5 el valor de las resistencias tanto de tracción como de potencia, aquí la curva amarilla (R1) y la curva púrpura (R2), son las

resistencias de tracción y potencia del lado oeste, que inician en valor cero y aumentan a medida que el tren se desplaza por el riel; mientras que la curva azul (R3) y la curva roja (R4), son las resistencias de tracción y potencia del lado este respectivamente, estas inician en su valor máximo final y van disminuyendo a medida que el tren se desplaza hacia la subestación 3, hasta llegar a cero.

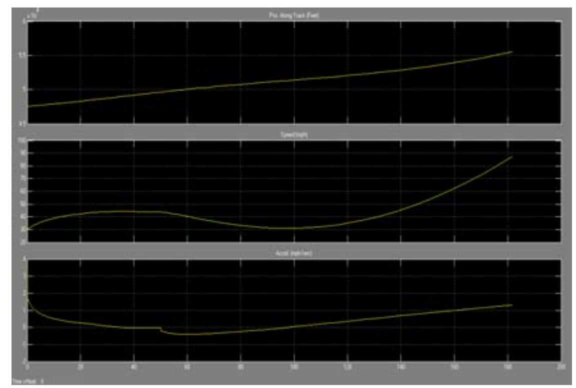


Figura 6. Respuesta del modelo basado en SimPowerSystem.

En la simulación también se puede apreciar el comportamiento de las respuestas obtenidas del modelo, la primera representa la posición del tren, la segunda su velocidad y la ultima su aceleración.

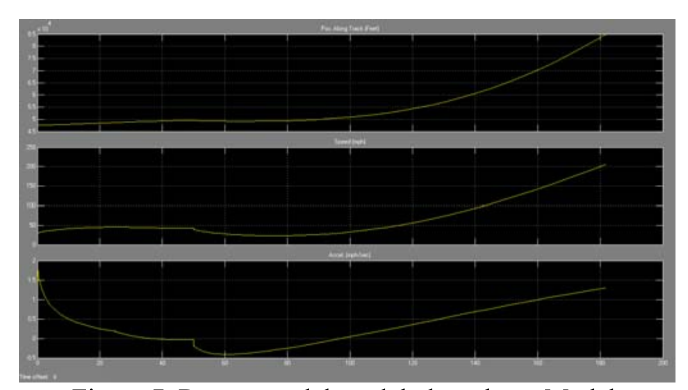


Figura 7. Respuesta del modelo basado en Matlab

En la Figura 7 se visualiza la respuesta del modelo ideal, es decir, basado en la evaluación numérica de las ecuaciones diferenciales, que definen el circuito electromagnético equivalente de un motor DC, al igual que en la figura 6, se presentan los aspectos más relevantes para el estudio del modelo del tren eléctrico, primero la posición, luego la velocidad y por ultimo su aceleración.

En la Figura 8, se observa la gráfica de correlación entre las respuestas obtenidas de simular con las herramientas SimPowerSystem y Matlab. Estas señales se obtienen de dividir entre sus homologas las señales de aceleración, posición y velocidad obtenida de cada modelo, con la idea de que al ser idénticas den como resultado un ‘uno’, en la figura puede notarse que el resultado es muy cercano a uno. La primera grafica representa la correlación entre las señales de posición, la segunda representa la correlación entre las señales de velocidad, y la última, la correlación entre las señales de aceleración.

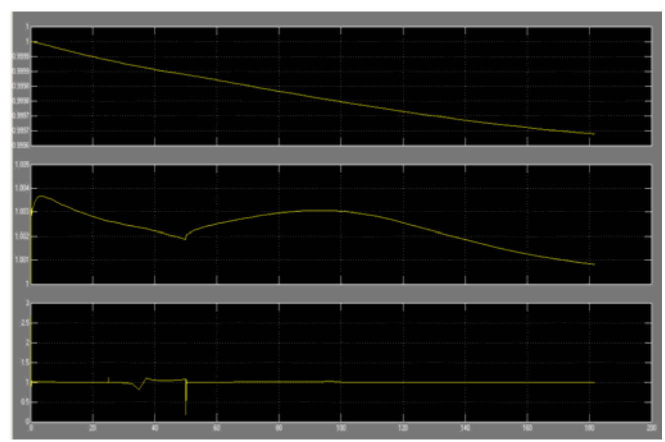


Figura 8. Señal de correlación entre respuestas de simulación SimPowerSystem y Matlab

La variación entre las respuestas obtenidas, surge de las características intrínsecas de las herramientas de simulación, pues SimPowerSystem al tratarse de una herramienta para uso específico de sistemas eléctricos modela de forma casi real el desempeño de los componentes propios del modelo aquí desarrollado, mientras que Matlab al realizar una evaluación numérica de las ecuaciones diferenciales y entrega una respuesta matemática, es decir, es ideal.

V. CONCLUSIONES

Matlab como herramienta de simulación es muy versátil, pero basta reconocer que sus toolbox son de propósitos específicos, en el presente artículo se lograron constatar las similitudes en las respuestas obtenidas al comparar gráficamente los resultados del modelo implementado en SimPowerSystem, contrapuesto a los resultados obtenidos de la simulación con Matlab. Dado que se trata del modelo de un sistema eléctrico, en el que es necesario analizar la respuesta de sus variables eléctricas, resulta más sencillo hacer uso de la herramienta SimPowerSystem, puesto a que no hay necesidad de estudiar numéricamente el comportamiento del sistema modelado (evaluación de variables físicas), es decir, esta herramienta permite modelar el sistema eléctrico en cuestión, sin necesidad de conocer las relaciones matemáticas que lo definen. En las situaciones donde se utiliza, las matemáticas necesarias para desarrollar estudios más complejos, será necesario desarrollar ecuaciones diferenciales haciendo uso de Matlab o Simulink.

La selección de la herramienta que será usada en el entorno Matlab dependerá entonces del tipo de sistema a modelar, de las variables a analizar y del estudio que se pretende realizar, una vez definidos estos tres escenarios, será posible definir cuál toolbox emplear, que permita simplificar el desarrollo del modelo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Marks. 2011.Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw Hill
Gran R. J. 2007.Numerical Computing with Simulink MATLAB, Volume 1.
Donald G. Fink, H. Wayne B. Carroll J. 1984. Manual práctico de electricidad para ingenieros.
Barkan C. 2007. Railroad transportation energy efficiency. Illinois railroad engineering program.
Orellano A. Aerodynamics of high speed trains. Estocolmo. 2010. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/airfri.html
Chapman S. Fundamentos de Máquinas Eléctricas. 4ta Edición.